

## 格氏栲天然林林窗和林下种子散布及幼苗更新研究

何中声<sup>a,b</sup>, 刘金福<sup>a,b\*</sup>, 郑世群<sup>a,b</sup>, 苏松锦<sup>a,b</sup>, 洪伟<sup>a,b</sup>, 吴则焰<sup>c</sup>, 徐道炜<sup>a,b</sup>,  
吴承祯<sup>a,b</sup>

(福建农林大学, a. 林学院; b. 福建省高校生态与资源统计重点实验室; c. 生命科学学院, 福州 350002)

**摘要:** 以格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)天然林为研究对象,探讨了林窗和林下格氏栲种子雨、种子库的分布特征及幼苗更新状况。结果表明:林窗种子雨总量和完好种子密度高于林下,未成熟种子比例低于林下;林窗和林下种子雨高峰期掉落数量分别占种子雨总量的 77.13% 和 74.5%;林窗种子库储量低于林下,种子库中以全食或捡拾种子比例最高,其中种子库储量垂直分布表现为枯落物层(约占 2/3) > 腐殖质层(0~5 cm)(约占 1/3) > 心土层(5~10 cm)(小于 1%),以格氏栲种子占绝对优势;格氏栲从种子到幼苗的转化率低,林窗中格氏栲完好种子密度与幼苗密度均高于林下。林窗微生境提高了种子散布过程中格氏栲成熟种子的密度和比例,有利于促进格氏栲的幼苗更新,表明林窗在格氏栲种群恢复过程中扮演着重要角色。

**关键词:** 格氏栲天然林; 林窗; 林下; 种子散布; 幼苗更新

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.05.012

## Studies on the Seeds Dispersal and Seedlings Regeneration in Gaps and Understory of *Castanopsis kawakamii* Natural Forest

HE Zhong-sheng<sup>a,b</sup>, LIU Jin-fu<sup>a,b\*</sup>, ZHENG Shi-qun<sup>a,b</sup>, SU Song-jin<sup>a,b</sup>, HONG Wei<sup>a,b</sup>, WU Ze-yan<sup>c</sup>,  
XU Dao-wei<sup>a,b</sup>, WU Cheng-zhen<sup>a,b</sup>

(a. College of Forestry; b. Key Laboratory of Fujian Universities for Ecology and Resource Statistics; c. College of Life Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Seed rain and seed bank distribution and seedlings regeneration status in forest gaps and understory of *Castanopsis kawakamii* natural forest were studied in Fujian Province. The results showed that the amount of total seeds and intact seeds in forest gaps were higher than those in understory, whereas immature seed rate in gaps was lower than that in understory. The falling seed rain at peak stage accounted for 77.13% and 74.5% of total seeds in forest gaps and understory, respectively. Seed reserve in forest gaps was lower than that in understory, which the most in seed bank were totally eaten by animals or picked up seeds in soil seed bank. The seed vertical distribution in soil seed bank was in order as litter layer (about 2/3) > humus layer (about 1/3) > subsoil layer (less than 1%), which dominated by *C. kawakamii* seeds. The convention rates from seed to seedlings were low in forest gaps and understory. The densities of intact seed and seedlings of *C. kawakamii* in forest gaps were higher than those in understory. It suggested that the microhabitat of forest gap improved the density and proportion of mature seeds in seeds dispersal and seedlings regenerated. Therefore, forest gaps play important roles in restoration of *C. kawakamii* population.

**Key words:** *Castanopsis kawakamii* natural forest; Forest gaps; Forest understory; Seed dispersal; Seedlings regeneration

收稿日期: 2011-12-14 接受日期: 2012-03-15

基金项目: 福建省自然科学基金重点项目(2008J0008);教育部博士点基金项目(200803890011);博士后基金项目(20070410796)资助

作者简介: 何中声(1985~),男,博士,主要从事野生动植物保护与利用研究。E-mail: jxhzs85@126.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fjlf@126.com

种子雨、种子库与幼苗更新是森林群落更新的关键环节<sup>[1]</sup>,种子雨是森林更新繁殖体的主要来源,且是土壤种子库的源,种子库是植物的潜在种群,幼苗则是植物种群更新与恢复的主要载体,种子雨、种子库和幼苗更新对植被恢复和生物多样性保护具有重要作用<sup>[2-3]</sup>。林窗在森林结构动态、群落物种共存和多样性维持中扮演着重要角色<sup>[4]</sup>。林窗干扰最直接、最重要的作用是提高生境中的光照条件,改变了局部环境的温、湿度状况,影响到土壤理化性质,为种子雨、种子库及幼苗生长提供了更多机会,促进了物种间共存,提高其天然更新能力<sup>[5-6]</sup>。探讨林窗干扰对种子雨、种子库分布特征和幼苗更新动态的影响,对种群天然更新具有重要意义<sup>[7-10]</sup>。

格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)是中国中亚热带南缘特有的壳斗科(Fagaceae)常绿阔叶高大乔木,其资源现已濒临枯竭,而在福建三明格氏栲自然保护区有 700 hm<sup>2</sup> 以格氏栲占优势的天然林分,实属罕见,被誉为“世界格氏栲林”,引起了广泛关注<sup>[11-16]</sup>,目前,格氏栲天然林更新困难,种群数量呈衰退趋势。林冠层出现严重的断层现象,林窗数量增多,林窗形成后微环境的空间异质性对种子雨、种子库和幼苗更新产生怎样影响值得探讨,而有关格氏栲天然林种子散布与幼苗更新研究也尚未见报道。为此,本文通过探讨格氏栲天然林林窗和林下种子雨与种子库的数量组成和种子质量,分析格氏栲幼苗的更新状况,旨在为格氏栲天然林的保护提供科学依据。

## 1 研究区概况

格氏栲天然林位于福建省格氏栲自然保护区内, 26°07'~26°10'N、117°24'~117°27'E,海拔 180~604 m,地处武夷山东伸支脉地带,属中亚热带季风型气候,年均气温 19.5℃,年均降雨量为 1500 mm,年平均相对湿度 79%;土壤类型主要为暗红壤,土层腐殖质丰富,水肥条件好。植物种类丰富,群落类型多样,郁闭度高达 0.8 左右,格氏栲种群年龄约有 100 年,格氏栲树冠常年浓绿,林相整齐,形成中亚热带常绿阔叶林所特有的外貌特征<sup>[16]</sup>。格氏栲林乔木层有格氏栲、米槠(*Castanopsis carlesii*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schima superba*)等;灌木层有赤楠(*Syzygium buxifolium*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、酸味子(*Antidesma japonicum*)等;草本层有狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)和华山姜(*Alpinia*

*oblongifolia*)等<sup>[13]</sup>。

## 2 研究方法

通过 2008 至 2010 年对格氏栲天然林种子结实量的野外调查,以格氏栲种子结实大年(即 2008 年)为研究对象。为了反映林窗形成后对格氏栲种子散布与幼苗更新的影响,分别在 8 个林窗及附近林下各选取 1 株格氏栲母树作为林窗与林下种子雨和种子库的调查对象,考虑调查结果可比性,母树的生长特征基本一致,尽量避免交叉重叠。林窗母树的平均树高为(21.8±5.3) m、平均胸径为(64.5±26.6) cm、平均冠幅为(9.1±2.3) m×(7.8±2.5) m,林下母树的平均树高为(23.9±3.5) m、平均胸径为(67.1±26.1) cm、平均冠幅为(8.9±2.0) m×(7.3±1.6) m。

### 2.1 种子雨调查

分别在林窗和林下母树的东南西北四个方位各设 1 m×1 m 样方 1 个,并将收集框放置于距母树约 2.5 m 处,以减少其它母树种子掉入收集框。预先清理样方内枯枝落叶及残余种子,采用尼龙网收集框(面积 1 m×1 m,网眼 2 mm×2 mm)采集,为了防止地面动物取食对种子雨收集的影响,采用支架使收集框离地约 0.8~1 m,每隔 5 d 收集一次框内种子,直至种子雨结束。统计种子总数、完好种子数(有活力的种子)、未成熟种子(形态成熟但不发芽)、虫蛀种子数(用手轻压即破碎)及啃食种子数(因动物及虫害破坏形成),种子活力测定采用 TTC 法<sup>[17]</sup>。

### 2.2 种子库调查

种子雨结束后调查土壤中种子的分布,在母树收集框附近调查 1 m×1 m 土壤样方中种子数量,分枯枝落叶层、腐殖质层(0~5 cm)和心土层(5~10 cm)共 3 层进行调查,将各层土样分装带回实验室,用孔径 0.25 cm 土壤筛分选土壤种子库中的种子,种子鉴定采用网筛分选法和种子萌发法相结合,并按完好、未成熟、虫蛀、霉变、部分食和全食或捡拾种子分别统计种子数。

### 2.3 幼苗更新调查

在林窗和林下每株母树周围设置 2~3 个 5 m×5 m 样方,记录样方内树高低于 1.5 m 更新幼苗的种类、数量、树高与冠幅等,统计格氏栲幼苗

的数量、高度和密度等。采用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 对实验数据进行统计与差异显著性检验。

### 3 结果和分析

#### 3.1 格氏栲天然林种子雨特征

格氏栲天然林林窗和林下的种子和壳斗在 10 月中旬开始掉落,初期掉落量较小,11 月中旬种子雨数量逐渐增多,11 月中下旬至 12 月中旬为掉落高峰期,到翌年 1 月下旬结束,历时 3 个月(图 1)。

从表 1 可见,林窗和林下种子雨的平均密度分别为 26.42 grain m<sup>-2</sup> 和 20.75 grain m<sup>-2</sup>。林窗和林下高峰期种子雨数量分别占种子雨总量的 77.13%

和 74.5%;初期占 13.25% 和 10.44%;种子雨末期仅占 9.62% 和 15.06%。种子雨掉落初期,格氏栲种子主要以完好、未成熟和啃食种子为主,以未成熟种子比例最高;随着种子发育成熟,高峰期种子主要以完好种子和被啃食种子为主,其中被啃食种子比例占一半以上,且被啃食种子主要是成熟种子,导致高峰期完好种子比例与初期差异不明显;种子雨末期种子主要以完好种子和被啃食种子为主。林窗种子雨总量、初期与高峰期完好有活力、未成熟、虫蛀、啃食或捡拾的格氏栲种子密度均高于林下,而林窗种子雨初期与高峰期未成熟和虫蛀种子比例小于林下。格氏栲完好种子比例在种子雨末

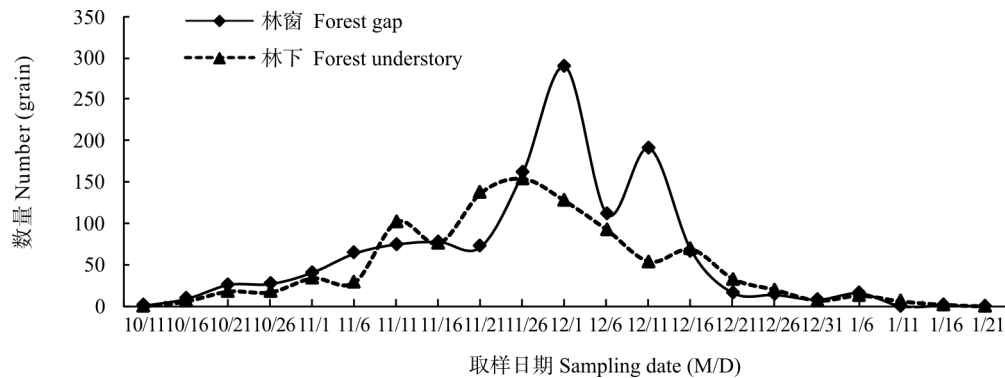


图 1 林窗和林下格氏栲种子雨数量动态

Fig. 1 Number of *Castanopsis kawakamii* seed rain in forest gaps and understory

表 1 林窗和林下格氏栲种子雨散布动态 (grain m<sup>-2</sup>)

Table 1 Dynamic distribution (grain m<sup>-2</sup>) of seed rain in forest gaps and understory of *Castanopsis kawakamii* natural forest

	初期 Early stage		高峰期 Peak stage		末期 End stage		总计 Total	
	G	U	G	U	G	U	G	U
完好种子 Intact seeds	1.29±0.12a	0.58±0.09b	5.79±0.76c	4.31±0.55d	1.04±0.16a	1.1±0.13a	8.13±0.48e	6±0.35c
%	36.9	26.92	28.43	27.9	40.98	35.33	30.76	28.92
未成熟种子 Immature seeds	0.85±0.16a	0.83±0.11a	2.02±0.18b	1.98±0.25b	0.6±0.12a	0.44±0.07a	3.48±0.29c	3.25±0.20c
%	24.4	38.46	9.92	12.8	23.77	14	13.17	15.66
虫蛀种子 Worm-eaten seeds	0.38±0.07a	0.06±0.02b	1.23±0.16c	0.35±0.05ab	0.13±0.02b	0.19±0.04b	1.73±0.12d	0.60±0.07e
%	10.71	2.88	6.03	2.29	4.92	6.00	6.55	2.91
被啃食种子 Seeds eaten by animal	0.98±0.22a	0.69±0.11a	11.33±1b	8.81±0.67c	0.77±0.19a	1.4±0.3a	13.08±0.51d	10.90±0.68b
%	27.98	31.71	55.62	57.01	30.33	44.67	49.53	52.51
总计 Total	3.50±0.47a	2.17±0.27a	20.38±1.68b	15.46±0.74c	2.54±0.46a	3.13±0.48a	26.42±5.12d	20.75±4.41b
%	13.25	10.44	77.13	74.5	9.62	15.06	100	100

G: 林窗; U: 林下, 下表同。同行数据后不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

G: Forest gap; U: Forest understory. The same is following Tables. Data followed different letters within line indicate significant difference at 0.05 level.

期最高,未成熟种子比例在初期最高。

### 3.2 格氏栲天然林种子库特征

#### 3.2.1 种子库储量及动态

从表 2 可见,格氏栲天然林林窗和林下土壤中的植物种子较少,除格氏栲、米楮、马尾松和木荷外,其它种子仅见华山姜、砂仁(*Amomum villosum*)和南酸枣(*Choerospondias axillaris*),林窗种子库密度低于林下。林窗和林下土壤种子库中以格氏栲种子占绝对优势,分别占土壤种子库总量的 96.15% 和 93.82%,其次是木荷和马尾松,天然林乔木层也以格氏栲、木荷和马尾松占优势,与天然群落分布格局类似。

#### 3.2.2 种子库的垂直分布

种子雨从降落后到次年 4 月,林窗和林下土壤种子库的种子数量和格氏栲种子数量均表现为枯

落物层 > 腐殖质层(0~5 cm) > 心土层(5~10 cm),其中枯枝落叶层的种子比例占 2/3 左右,腐殖质层占 1/3 左右,而心土层比例则不到 1%。除心土层外,不同层次林窗种子库密度均低于林下(表 3)。

#### 3.2.3 种子库中格氏栲种子质量

林窗中格氏栲完好种子的比例大于林下,霉变、虫蛀与发育不全种子的比例小于林下,林窗光温水环境的改善促进了格氏栲种子的发育,同时避免了昆虫和真菌等对种子的破坏。林窗和林下种子库中格氏栲种子以全食或捡拾的比例最高,分别占总量的 81.68% 和 82.04%,完好种子比例仅占总量的 8% 和 4.28%(表 4)。

### 3.3 格氏栲种子散布与幼苗更新状况

大多数壳斗科植物种子无休眠期,发芽条件相对简单,掉落后如果温湿度适合就能萌发。从表

表 2 林窗和林下土壤种子库的组成(grain m<sup>-2</sup>)

Table 2 Seed bank (grain m<sup>-2</sup>) in soil in forest gaps and understory of *Castanopsis kawakamii* natural forest

	格氏栲 <i>C. kawakamii</i>	米楮 <i>C. carlesii</i>	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	木荷 <i>Schima superba</i>	其它 Others	总计 Total
G	14.84±1.32a	0.09±0.03a	0.13±0.03a	0.16±0.04a	0.22±0.05a	15.44±1.29a
%	96.15	0.61	0.81	1.01	1.42	
U	18.97±2.29b	0.03±0.01b	0.31±0.07b	0.69±0.12b	0.22±0.04a	22.22±2.26b
%	93.82	0.15	1.55	3.40	1.08	

同列数据后不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),下表同。

Data followed different letters within column indicate significant difference at 0.05 level. The same is following Tables.

表 3 格氏栲天然林林窗土壤种子库的垂直分布(grain m<sup>-2</sup>)

Table 3 Vertical distribution (grain m<sup>-2</sup>) of soil seed bank in forest gaps and understory of *Castanopsis kawakamii* natural forest

	枯枝落叶层 Litter layer		腐殖质层 Humus layer		心土层 Subsoil layer	
	总和 Total	格氏栲 <i>C. kawakamii</i>	总和 Total	格氏栲 <i>C. kawakamii</i>	总和 Total	格氏栲 <i>C. kawakamii</i>
G	43.13±3.29a	41.13±3.41a	18.38±1.83a	18±1.81a	0.25±0.09a	0.25±0.09a
%	69.84	66.6	29.76	29.15	0.40	0.40
U	56.63±5.62b	53±5.67b	24±3.43b	22.63±3.47b	0.25±0.09a	0.25±0.09a
%	70.02	65.53	29.68	27.98	0.31	0.31

表 4 林窗和林下土壤种子库中各类格氏栲种子的数量(grain m<sup>-2</sup>)

Table 4 Number (grain m<sup>-2</sup>) of *Castanopsis kawakamii* seeds in soil seed bank in forest gaps and understory of *C. kawakamii* natural forest

	完好 Intact seeds	部分被食 Partly eaten seeds	全食或捡拾 Totally eaten or picked up seeds	霉变 Decayed seeds	虫蛀 Worm-eaten seeds	未熟 Immature seeds
G	1.19±0.20a	0.34±0.06a	12.13±1.16a	0a	0.06±0.01a	1.16±0.20a
%	8.00	2.32	81.68	0.00	0.42	7.79
U	0.81±0.07b	0.25±0.03b	15.56±2.25b	0.25±0.06b	0.38±0.06b	1.81±0.27b
%	4.28	1.32	82.04	1.32	1.98	9.56

表5 林窗和林下格氏栲的种子散布与幼苗更新

Table 5 Seed dispersal and seedlings regeneration of *Castanopsis kawakamii* in forest gaps and understory

	种子雨总量		种子雨中完好种子		种子库中完好种子		幼苗
	Total seed rain (grain m <sup>-2</sup> )		Intact seeds in seed rain (grain m <sup>-2</sup> )		Intact seeds in seed bank (grain m <sup>-2</sup> )		Seedlings (Ind. hm <sup>-2</sup> )
G	26.42±1.40a	30.76%→	8.13±0.48a	14.64%→	1.19±0.20a	9.79%→	1165±346(4.53%)a
U	20.75±1.30b	28.92%→	6.00±0.35b	13.50%→	0.81±0.07b	10.68%→	865±326(3.54%)b

5 可见,林窗和林下种子散布的格局与幼苗更新状况存在显著差异。由表 1 和 4 可见,林窗和林下种子雨中格氏栲种子总量分别为 26.4 grain m<sup>-2</sup> 和 20.7 grain m<sup>-2</sup>,完好种子分别为 8 grain m<sup>-2</sup> 和 6 grain m<sup>-2</sup>,转化率分别为 30.76% 和 28.92%。土壤种子库中完好种子为 1.19 grain m<sup>-2</sup> 和 0.81 grain m<sup>-2</sup>,转化率下降为 14.64% 和 13.50%。野外林窗和林下格氏栲幼苗密度分别为 1165 ind. hm<sup>-2</sup> 和 865 ind. hm<sup>-2</sup>,仅占所调查幼苗数量的 4.53% 和 3.54%。林窗和林下种子库中完好格氏栲种子到幼苗的转化率分别为 9.79% 和 10.68%,而所有格氏栲种子到幼苗转化率仅为 0.44% (30.76%×14.64%×9.79%) 和 0.42% (28.92%×13.50%×10.68%)。

#### 4 讨论

格氏栲种子结实有大小年之分,其结实量差异非常大,可能与生理因素和环境条件的综合作用有关。2008 年格氏栲种子雨掉落初期未成熟种子比例最高,主要与种子发育过程有关,初期部分种子发育尚不完全,大部分是干瘪的不完整种子,而末期种子已进入形态成熟阶段,种子成熟比例最高。随着种子发育成熟,高峰期被啃食种子比例占一半以上,表明啮齿类动物对格氏栲种子的取食强度,与种子雨完好种子的变化趋势基本一致,表明动物对未成熟种子不感兴趣,具有一定的取食选择性<sup>[18]</sup>,且啮齿类动物对种子鉴别和选择影响着种子未来命运与幼苗更新<sup>[19]</sup>;此外存在鸟类、象鼻虫、草食性蚂蚁及微生物等取食格氏栲种子,与保护区其它植物种子相比格氏栲种子淀粉含量较高,更易被取食,与壳斗科栲树种子损失因素相一致<sup>[20]</sup>。林窗种子雨总量、初期与高峰期完好格氏栲种子密度均高于林下,在于林窗干扰促进微环境条件的改善,特别是光照和太阳辐射,促进了种子提前成熟与脱落,对格氏栲种子发育具有促进作用,林窗完好种子比例大于林下,未成熟种子比例小于林下。由于不同类型生物在林窗中活动增加,导致林窗内被啃

食和虫蛀的格氏栲种子密度高于林下。

格氏栲天然林林窗的种子库储量低于林下,主要与林窗面积大小、发育期及种子传播方式有关,这与茂山喀斯特和长白山林隙种子库的分布特征一致<sup>[7,21]</sup>。林窗发育早期种子来源少,随着边界木偏冠枝条的生长,增加了林窗种子库输入,而林下格氏栲种子输入存在叠加性导致林下格氏栲种子密度较大。林窗中格氏栲完好种子比例大于林下,霉变、虫蛀与未熟种子比例小于林下,其主要原因有:(1)林窗内土壤微生物活动更为活跃,凋落层分解速度加快和土壤养分归还增多<sup>[22]</sup>,凋落层厚度下降对种子进入土壤阻碍降低,部分种子能有效进入到养分丰富的腐殖质层,一旦环境适合,种子可萌发生长,幼苗初期的生长速度更快且抵御外界环境压力更强,而林窗发育晚期枯落层的增厚则成为种子进入土壤的限制因子;(2)林下种子难以穿过根系、枯枝落叶层与草本层构成的厚隔离带<sup>[18]</sup>,种子萌发过程中为了突破地被层的机械阻碍不得不分配更多物质与能量用于胚轴生长<sup>[23]</sup>,导致供子叶和胚根生长的养分与能量相对较少,萌发幼苗长势较差。林窗和林下种子库组成比例中格氏栲种子被啃食或捡拾的比例最高,完好种子的比例仅占总量的 8% 和 4.28%,种子易被取食和搬运,取食压力始终是富含淀粉的壳斗科等种子<sup>[22-27]</sup>损耗的首要因子。格氏栲种子个体大,营养物质丰富有利于种子发芽,同等条件下幼苗抵抗不良环境的能力更强,但种子所受到取食压力也相应增大,应加强对格氏栲种子的保护,避免其数量进一步下降。

林窗和林下的格氏栲从种子到幼苗的转化率较低,仅为 0.44% 和 0.42%,由于虫蛀种子、部分被食用的格氏栲种子仍具萌发能力,实际转化率可能会稍高,但总体转化率仍较低,表明环境条件和自身生物学特性对其种子和幼苗筛选加剧,其种群存在退化和被演替趋势。壳斗科其它植物的更新研究表明,滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucooides*)种子萌发数仅为当年产种子数的 0.26%<sup>[24]</sup>,高山栲

(*Castanopsis delavayi*)群落的幼苗密度较低,且实生苗对种群更新没有贡献<sup>[25]</sup>,猫儿山蒙古栎(*Quercus mongolica*)种子萌发率为11.1%<sup>[26]</sup>,闽清福建青冈(*Cyclobalanopsis chungii*)种子萌发率低,天然林土壤中未发现福建青冈种子<sup>[27]</sup>。壳斗科植物种子野外萌发率较低,更新困难,部分物种为了保障物种延续和数量稳定形成以萌生苗作为其更新的主要对策,而格氏栲萌生苗生长到一定阶段逐渐萎缩,难以达到主林层,其形成原因值得探讨。林窗和林下幼苗密度存在显著差异,表明林窗为格氏栲种子萌发提供了空间条件,特别是随着林窗发育,边界木的偏冠率增大,在提供较好光照的同时又能适当遮阴,以满足格氏栲幼苗初期需耐荫而生长到一定阶段需要足够光照的特性。林窗为幼苗生长创造了适宜环境,使幼苗和幼树生长得到释放,高生长加快,表明格氏栲天然林林窗在种子散布与萌发、幼苗生长及种群更新过程中扮演重要角色,对维持天然林物种多样性与稳定性具有重要意义。

### 参考文献

- [1] Leck M A, Parker V T, Simpson R L. Ecology of Soil Seed Bank [M]. San Diego: Academic Press, 1989: 1–21.
- [2] Nathan R, Muller-Landau H C. Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment [J]. Trends Ecol Evol, 2000, 15(7): 278–285.
- [3] Yin H J, Cheng X Y, Lai T, et al. Seed rain, soil seed bank and seedling regeneration in a 65-year *Picea asperata* plantation in subalpine coniferous, western Sichuan, China [J]. Chin J Plant Ecol, 2011, 35(1): 35–44.  
尹华军, 程新颖, 赖挺, 等. 川西亚高山65年人工云杉林种子雨、种子库和幼苗定居研究 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(1): 35–44.
- [4] Hubbell S P, Foster R B, O'Brien S T, et al. Light-gap disturbances, recruitment limitation, and tree diversity in a neotropical forest [J]. Science, 1999, 283(5401): 554–557.
- [5] Auffret A G, Cousins S A O. Past and present management influences the seed bank and seed rain in a rural landscape mosaic [J]. J Appl Ecol, 2011, 48(5): 1278–1285.
- [6] Norghauer J M, Newbery D M. Seed fate and seedling dynamics after masting in two African rain forest trees [J]. Ecol Monog, 2011, 81(3): 443–469.
- [7] Long C L, Yu S X. Space variation of seed rain and seed bank in gaps of Karst forest in Maolan Nature Reserve, Guizhou Province [J]. Acta Bot Yunnan, 2007, 29(3): 327–332.  
龙翠玲, 余世孝. 茂兰喀斯特森林林隙种子雨、种子库空间变异 [J]. 云南植物研究, 2007, 29(3): 327–332.
- [8] Zang R G, Ding Y, Zhang W Y. Seed dynamics in relation to gaps in a tropical montane rainforest of Hainan Island, South China: (II) Seed bank [J]. J Intger Plant Biol, 2008, 50(5): 513–521.
- [9] Yan Q L, Zhu J J, Zhang J P, et al. Spatial distribution pattern of soil seed bank in canopy gaps of various sizes in temperate secondary forests, Northeast China [J]. Plant Soil, 2010, 329(1/2): 469–480.
- [10] Du Y J, Mi X C, Ma K P. Comparison of seed rain and seed limitation between community understory and gaps in a subtropical evergreen forest [J/OL]. Acta Oecol, 2011, doi: 10.1016/j.actao.2011.06.001.
- [11] Liu J F, Hong W, Pan D M, et al. A study on multidimensional time series model of individual age's measurement in *Castanopsis kawakamii* population [J]. Acta Ecol Sin, 2009, 29(4): 232–236.
- [12] He Z S, Liu J F, Hong W, et al. Study on the seedlings competition intensity in a mid-subtropical *Castanopsis kawakamii* nature forest [J]. J Trop Subtrop Bot, 2011, 19(3): 230–236.  
何中声, 刘金福, 洪伟, 等. 中亚热带格氏栲天然林幼苗竞争强度研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(3): 230–236.
- [13] He Z S, Liu J F, Zheng S Q, et al. Study on the characteristics of gap border trees in *Castanopsis kawakamii* natural forest [J]. J Fujian Coll For, 2011, 31(3): 207–211.  
何中声, 刘金福, 郑世群, 等. 格氏栲天然林林窗边界木特征研究 [J]. 福建林学院学报, 2011, 31(3): 207–211.
- [14] Liu J F, Hong W, Li J Q, et al. Gap natural disturbance regime in the *Castanopsis kawakamii* forest [J]. Acta Ecol Sin, 2003, 23(10): 1991–1999.  
刘金福, 洪伟, 李俊清, 等. 格氏栲林林窗自然干扰规律 [J]. 生态学报, 2003, 23(10): 1991–1999.
- [15] Liu J F, Hong W. A modified logistic model of the growth pattern of dominance in a *Castanopsis kawakamii* population [J]. Acta Phytoecol Sin, 2001, 25(2): 225–229.  
刘金福, 洪伟. 格氏栲种群优势度增长改进模型的研究 [J]. 植物生态学报, 2001, 25(2): 225–229.
- [16] Liu J F, Hong W, Li J H, et al. Population ecology of *Castanopsis kawakamii*: III. Growth dynamics of dominance of *Castanopsis kawakamii* population [J]. Chin J Appl Ecol, 1998, 9(5): 453–457.  
刘金福, 洪伟, 李家和, 等. 格氏栲种群生态学研究 III. 格氏栲种群优势度增长动态规律研究 [J]. 应用生态学报, 1998, 9(5): 453–457.
- [17] Woodstock L W. Physiological and biochemical tests for seed vigor [J]. Seed Sci Techn, 1973, 1(1): 127–157.
- [18] Liu Z G, Zhu J J, Yuan X L, et al. Investigation and analysis of the natural regeneration of *Larix olgensis* in mountain regions of eastern Liaoning Province, China [J]. Sci Silv Sin, 2007, 43(1): 42–49.

- 刘足根, 朱教君, 袁小兰, 等. 辽东山区长白落叶松天然更新调查 [J]. 林业科学, 2007, 43(1): 42–49.
- [19] Xiao Z S, Zhang Z B, Wang Y S. Rodent's ability to discriminate weevil-infested acorns: Potential effects on regeneration of nut-bearing plants [J]. Acta Theriol Sin, 2003, 23(4): 312–320.  
肖治术, 张知彬, 王玉山. 啮齿动物鉴别虫蛀种子的能力及其对坚果植物更新的潜在影响 [J]. 兽类学报, 2003, 23(4): 312–320.
- [20] Du X J, Guo Q F, Gao X M, et al. Seed rain, soil seed bank, seed loss and regeneration of *Castanopsis fargesii* (Fagaceae) in a subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. For Ecol Manag, 2007, 238(1/2/3): 212–219.
- [21] Zhang Z T, Song X Z, Xiao W F, et al. The seed bank in logging gaps in *Populus davidiana*-*Betula platyphylla* secondary forests in Changbai Mountain [J]. Sci Silv Sin, 2009, 45(1): 21–26.  
张智婷, 宋新章, 肖文发, 等. 长白山杨桦次生林采伐林隙种子库特征 [J]. 林业科学, 2009, 45(1): 21–26.
- [22] Dupuy J M, Chazdon R L. Interacting effects of canopy gap, understory vegetation and leaf litter on tree seedling recruitment and composition in tropical secondary forests [J]. For Ecol Manag, 2008, 255(11): 3716–3725.
- [23] Kennedy P G, Schouboe J L, Rogers R H, et al. *Frankia* and *Alnus rubra* canopy roots: An assessment of genetic diversity, propagule availability, and effects on soil nitrogen [J]. Microb Ecol, 2010, 59(2): 214–220.
- [24] Su W H, Zhang G F. Dynamics of the seed bank of *Cyclobalanopsis glaucooides* in *Cyclobalanopsis glaucooides* forest on the Xishan mountain in Kunming [J]. Acta Bot Yunnan, 2002, 24(3): 289–294.  
苏文华, 张光飞. 昆明西山滇青冈林内滇青冈种子库动态的研究 [J]. 云南植物研究, 2002, 24(3): 289–294.
- [25] Fei S M, Peng Z H, Yang D S, et al. Seed rain and seed bank of *Castanopsis delavayi* populations in mountainous area of southwest Sichuan [J]. Sci Silv Sin, 2006, 42(2): 49–55.  
费世民, 彭镇华, 杨冬生, 等. 川西南山地高山栲种群种子雨和地表种子库研究 [J]. 林业科学, 2006, 42(2): 49–55.
- [26] Liu T, Zhou Z Q. Seed rain and soil seed bank of *Quercus mongolica* populations [J]. J NE For Univ, 2007, 35(5): 22–23.  
刘彤, 周志强. 蒙古栎种群种子雨与地表种子库 [J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(5): 22–23.
- [27] Huang Y R, Ma X Q, Zhuang K, et al. Seed rain and soil seed bank of *Cyclobalanopsis chungii* forest in Minqing, Fujian Province [J]. J Trop Subtrop Bot, 2010, 18(1): 68–74.  
黄雍容, 马祥庆, 庄凯, 等. 福建闽清福建青冈天然林种子雨和种子库 [J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(1): 68–74.